



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Frischbetondruck bei frei geformten Schalungssystemen

Björn Freund
Tilo Proske
Carl-Alexander
Graubner

Institut für
Massivbau,
Technische
Universität Darmstadt

Bei modernen Massivbauwerken werden zunehmend geneigte Betonbauteile als Gestaltungselement verwendet. Schalungssysteme für derartige Betonbauteile werden oftmals als Unikate für den einmaligen Anwendungsfall hergestellt und können häufig nicht wiederverwendet werden. Daher war das maßgebliche Ziel des Forschungsvorhabens *Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile*, Schalungssysteme zu entwickeln, die freie Formen annehmen und die wiederverwendet werden können.

Hinsichtlich der Dimensionierung von doppelhäuptigen Schalungssystemen stellt der Frischbetondruck die maßgebliche Einwirkung dar. Die existierende Norm zum Frischbetondruck DIN 18218 enthält bisher keine Angaben für geneigte Schalungen. Daher wird in der Baupraxis bei geneigten Schalungen oftmals der hydrostatische Frischbetondruck angesetzt, was u. U. zu einer Überdimensionierung des Schalungssystems bzw. zu einer unnötigen Verringerung der zulässigen Betoniergeschwindigkeit und somit zu einer längeren Herstellzeit führt. Im nachfolgenden Beitrag werden experimentelle und analytische Untersuchungen zum Frischbetondruck bei frei geformten Schalungssystemen vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Frischbetondruck bei geneigten Schalungen mit konstanter Bauteildicke kleiner ausfällt als bei lotrechten Schalungen.

1 Einführung

Bauwerke mit großem architektonischem Anspruch, wie das Wissenschaftsmuseum phäno in Wolfsburg, das Library & Learning Center der Wirtschaftsuniversität Wien oder das Rolex Learning Center der ETH Lausanne, werden zunehmend aus frei geformten und damit auch geneigten Betonbauteilen errichtet. Bei der Herstellung derartig anspruchsvoller Betonbauwerke kommen regelmäßig individuell für den einmaligen Anwendungsfall produzierte Schalungssysteme zum Einsatz, die oft nicht wiederverwendet werden können.

Ziel des Forschungsprojektes *Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile* ist es, Grundlagen für Schalungssysteme zu entwickeln, die sich flexibel auf verschiedene freie Formen einstellen lassen und mehrmals eingesetzt werden können. Dazu ist es notwendig, genaue Kenntnis über den bisher nahezu unbekannten Frischbetondruck bei geneigten und gekrümmten Schalungssystemen zu erlangen.

Für die Dimensionierung von Schalungssystemen für wand- oder stützenartige Betonbauteile stellt der Frischbetondruck die maßgebliche Einwirkungsgröße dar. Die Norm DIN 18218 [1] zur Berechnung des Frischbetondrucks enthält bisher jedoch keinen Berechnungssatz zur Bestimmung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungssystemen. AST & FRÖHLICH [2] schlagen bei geneigten Schalungen ein modifiziertes Lastbild für den Frischbetondruck vor. Dabei wird zunächst der Frischbetondruck nach DIN 18218 [1] für eine lotrechte Schalung ermittelt und entsprechend dem angegebenen Lastbild mit einer vertikalen hydrostatischen Druckkomponente überlagert [3]. Auch internationale technische Regelwerke wie ACI 347-04 [4] oder Bulletin D'Information

No. 115 [5] machen keine konkreten Angaben zur Bestimmung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungssystemen. Die im CIRIA-Report 108 [6] aufgeführten Ansätze zur Bestimmung des Frischbetondrucks für lotrechte Schalungen können allerdings auch für einseitig geneigte und beidseitig nicht parallel geneigte Schalungen verwendet werden. In CIRIA-Report 108 werden jedoch keine Anwendungsgrenzen angegeben, was evtl. zu Sicherheitsdefiziten führen kann. Veröffentlichte Ergebnisse von Versuchen zur Messung des Frischbetondrucks bei geneigten oder gekrümmten Betonbauteilen sind bisher nicht bekannt. Von PROSKE [7] wurden erstmalig theoretische Untersuchungen zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen durchgeführt. Dabei wurde die Reibung zwischen Frischbeton und der Schalung bzw. der Bewehrung auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass sich der Frischbetondruck im Vergleich zu einer lotrechten Schalung bei einer oberen Schalung vermindert und bei einer unteren Schalung erhöht.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Allgemeines

Zur Analyse des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungen wurden im Rahmen des DFG-geförderten Forschungsprojektes zahlreiche Großversuche an Wandbauteilen durchgeführt. In den Experimenten erfolgte zeitgleich die Betonage einer geneigten und einer lotrechten Wand mit jeweils doppelhäuptiger Schalung. Die Ergebnisse für die lotrechte Schalung können somit als direkte Referenz für die geneigte Schalung dienen.

2.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Großversuche wurden ein lotrechtes und ein geneigtes Schalungssystem errichtet, welches in Bild 1 dargestellt ist.



Bild 1: Versuchstand für die Betonversuche; im Vordergrund: geneigtes Schalungssystem, im Hintergrund: lotrechtes Schalungssystem [Foto: Björn Freund]

Sowohl die lotrechte Schalung als auch die geneigte Schalung hatten eine Höhe von 3,50 m. Die Wandbreite betrug ca. 1,10 m. Die Wanddicke beider Schalungen war stufenlos von 0,1 bis 0,5 m einstellbar. Die Neigung zur Lotrechten α der geneigten Schalung war ebenfalls von 0° bis 60° stufenlos einstellbar. Zur Messung der Ankerkräfte war jede Ankerlage mit einer Kraftmessdose ausgestattet. Um den Frischbetondruck direkt zu messen, waren in die Schalhaut zusätzliche Drucksensoren eingebaut.

Während eines Betonversuchs wurden die lotrechte und die geneigte Schalung nahezu zeitgleich befüllt. Der maßgebliche Unterschied zwischen der lotrechten und der geneigten Schalung bestand im Neigungswinkel, alle übrigen Parameter wurden während eines Versuchs für beide Schalungen identisch gehalten.

2.3 Versuchsparameter

Es wurden 15 Großversuche durchgeführt. Die geplanten Referenzparameter waren eine Konsistenzklasse F5 nach DIN EN 206-1 [8], eine vertikale Steiggeschwindigkeit von $v = 2 \text{ m/h}$, die Neigung von $\alpha = 45^\circ$ zur Lotrechten der geneigten Schalung, eine Wand mit Bewehrung und eine Wanddicke von $b = 20 \text{ cm}$. In den Versuchen mit Bewehrung wurden als Oberflächenbewehrung Betonstahlmatten vom Typ Q188A beidseitig in die Wände angeordnet. Das Versuchsprogramm war derart ausgelegt, dass die Einflüsse der Betoniergeschwindigkeit v , der Konsistenz, des Frischbetons, der Verdichtungsintensität, der Bewehrung, der Bauteildicke b und der Schalungsneigung α auf den Frischbetondruck untersucht werden konnten. Die maßgeblichen Versuchsparemeter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Ein Vergleich der direkt gemessenen Frischbetondrücke auf die obere ($\sigma_{\text{ge,o,DS}}$) und die untere Schalung ($\sigma_{\text{ge,u,DS}}$) zeigt, dass die Druckunterschiede im Wesentlichen aus dem Eigengewicht des Frischbetons resultieren. In Bild 2 ist der aus den Ankerkräften errechnete maximale Frischbetondruck bei lotrechter Schalung σ_{lot} aufgetragen, während Bild 3 den entsprechenden Wert auf die obere geneigte Schalung $\sigma_{\text{ge,o}}$ enthält. Nachfolgend werden diese Ergebnisse miteinander verglichen, um den Einfluss der Bauteilneigung auf den Frischbetondruck zu identifizieren.

Die Konsistenzklasse F5 in Versuch 1.3 entspricht der planmäßigen Konsistenz weshalb die Messwerte aus Versuch 1.3 als Referenz definiert werden.

Bild 2: Maximale Frischbetondrücke der lotrechten Schalung σ_{lot}

Bild 3: Maximale Frischbetondrücke der oberen geneigten Schalung $\sigma_{\text{ge,o}}$

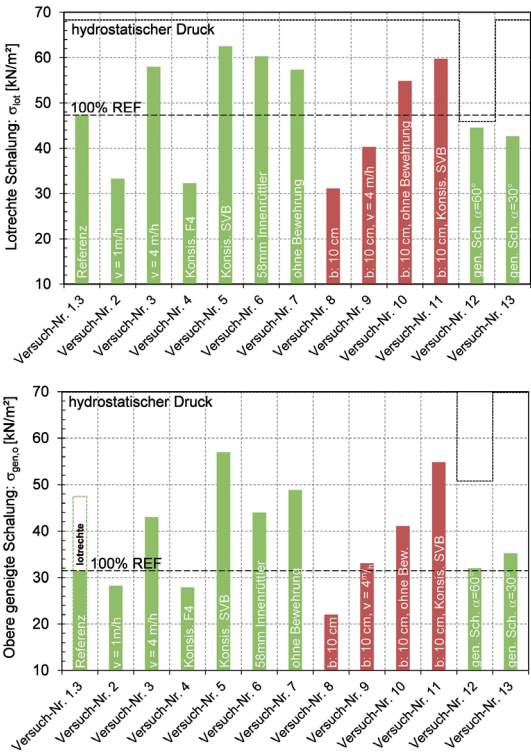


Tabelle 1: Versuchsparameter und Betonkennwerte (Ist-Werte) der Großversuche

Betrachtung von	Versuch Nr. [-]	Schalungs- neigung α [°]	Wand- dicke b [m]	Steig- geschwindigkeit v [m/h]	Bewehrung	Durchmes- ser Rüttler [mm]	Ausbreit- maß f [mm]	Konsistenz- klasse [-]	Erstarrungs- ende $t_{E,eff}$ [h]	Frischbeton- temperatur T [°C]
Referenz	1.1	0 45	0,2	2,2	Ja	Ø38	540	F4	6,4	23,4
	1.2	0 45	0,2	2,3	Ja	Ø38	670	F6	9,8	19,8
	1.3	0 45	0,2	2,3	Ja	Ø38	560	F5	11,7	16,4
Steig- geschwindigkeit	2	0 45	0,2	1,2	Ja	Ø38	640	F6	8,8	22,5
	3	0 45	0,2	4,1	Ja	Ø38	645	F6	6,6	22,6
Konsistenz	4	0 45	0,2	2,2	Ja	Ø38	510	F4	5,9	21,8
	5	0 45	0,2	2,3	Ja	--	850 ¹⁾	SVB	9,0	22,0
Verdichtung	6	0 45	0,2	2,3	Ja	Ø58	565	F5	10,8	14,7
Bewehrung	7	0 45	0,2	2,3	Nein	Ø38	600	F5	11,0	17,0
	8	0 45	0,1	2,3	Ja	Ø38	600	F5	9,3	17,2
Wanddicke	9	0 45	0,1	4,0	Ja	Ø38	625	F5	11,2	16,7
	10	0 45	0,1	2,1	Nein	Ø38	570	F5	10,4	18,5
	11	0 45	0,1	2,3	Ja	--	875 ¹⁾	SVB	16,2	15,2
Wand- neigung	12 ²⁾	0 60	0,2	2,4	Ja	Ø38	650	F6	11,8	14,8
	13	0 30	0,2	2,3	Ja	Ø38	570	F5	12,2	15,2

- Gemeinsame Parameter:
- Wandhöhe: lotrechte Wand $H = 3,50$ m; geneigte Wand ca. $H = 3,50$ m; Ausnahme; Versuch Nr. 12: lotrechte Wand $H = 2,50$ m; geneigte Wand: $H = 2,34$ m)
 - Mittlere Dichte des Frischbetons: $\rho_{cm} = 2320$ kg/m³
 - ¹⁾ Setzfließmaß nach DIN EN 12350-8 (2010) [9]

3.2 Steiggeschwindigkeit, Konsistenz und Verdichtung

Die maximalen Drücke in Versuch 2 mit kleinerer Steiggeschwindigkeit sind deutlich geringer als im Referenzversuch. In Versuch 3 mit höherer Steiggeschwindigkeit waren die maximalen Frischbetondrücke entsprechend größer. Im Versuch 4, in dem eine steifere Konsistenz zur Anwendung kam, waren die Frischbetondrücke erwartungsgemäß kleiner als die des Referenzversuches 1.3. Umgekehrt lagen sie bei Verwendung eines selbstverdichtenden Betons (Versuch 5) deutlich höher, jedoch auch bei lotrechter Schalung noch immer unter dem hydrostatischen Wert. Mit Versuch 6 sollte der Einfluss einer höheren Verdichtungsintensität auf den Frischbetondruck analysiert werden. Die Maximalwerte in Versuch 6 waren jeweils größer als im Referenzversuch. Die Verdichtungsintensität hat somit einen erheblichen Einfluss auf den Frischbetondruck.

3.3 Bewehrung und Bauteildicke

Die maximalen Frischbetondrücke in Versuch 7 zur Untersuchung des Einflusses der Bewehrung fielen im Vergleich zur Referenz wiederum signifikant größer aus. Somit belegt Versuch 7 den erheblichen Einfluss der Bewehrung auf den entstehenden Frischbetondruck, ein Effekt, der z. B. von DIN 18218 (2010) [1] bisher vernachlässigt wird.

Mit Hilfe der Versuche 8 bis 11 mit Wanddicken von 10 cm sollte der Einfluss der Wanddicke auf den Frischbetondruck bei schlanken Bauteilen verifiziert werden. Die Frischbetondrücke stellten sich bei geringer Wandstärke im Vergleich zu den entsprechenden Versuchen mit einer Wanddicke von 20 cm signifikant kleiner ein. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich bei dünnen leichten Betonbauteilen auch geringere Frischbetondrücke einstellen. Diese Tatsache gestattet bei dünnen Konstruktionen die Verwendung leichterer und kostengünstigerer Schalungssysteme und/oder die Beschleunigung des Betoniervorgangs.

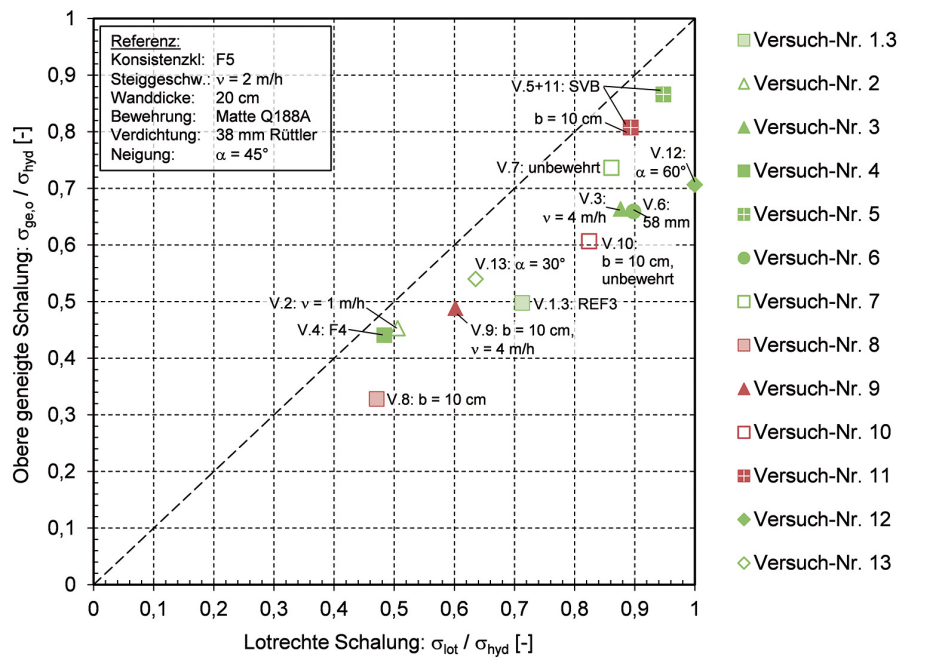


Bild 4: Normierte Frischbetondrücke der lotrechten und der oberen geneigten Schalung

3.4 Lotrechte Schalung versus geneigte Schalung

Bild 4 zeigt die in den Versuchen maximal aufgetretenen Frischbetondrücke, normiert auf den hydrostatischen Frischbetondruck. Auf der Abszisse sind die normierten Drücke der lotrechten Schalung aufgetragen. Auf der Ordinate sind die normierten Drücke der oberen geneigten Schalung dargestellt. Zunächst fällt auf, dass alle Punkte unterhalb der Halbierenden liegen. Dies bedeutet, dass der Frischbetondruck auf die obere geneigte Schalung immer kleiner war als auf die lotrechte Schalung.

Bei dem Referenzversuch 1.3 betrug der maximale Frischbetondruck auf die lotrechte Schalung 71 % des hydrostatischen Drucks, während bei einer Schalungsneigung von 45° nur 47 % des hydrostatischen Drucks auftraten. In den Versuchen 2 und 4 ergaben sich bei lotrechter und bei geneigter Schalung die absolut kleinsten Maximalwerte für die Wandstärke von 20 cm, die Schalungsneigung hatte jedoch nur geringere Auswirkungen (< 15 %). Dieses Ergebnis legt die Vermutung nahe, dass bei geringer Steiggeschwindigkeit und mittlerer Konsistenzklasse (F3, F4) mit entsprechend niedrigem Frischbetondruck der Neigungseinfluss von geringerer Bedeutung ist.

Deutlichere Unterschiede zeigen die Ergebnisse der Frischbetondrücke der lotrechten und der oberen geneigten Schalung in den Versuchen 3, 6 und 12. Bei lotrechter Schalung stellte sich ein Frischbetondruck zwischen 88 % und 100 % des hydrostatischen Drucks ein, während bei geneigter Schalung nur 64 % und 68 % gemessen wurden. Die großen Unterschiede können mit der Tatsache erklärt werden, dass bei geneigter Schalung die Entfernung zwischen Rüttler und dem Bereich der Schalung mit maximalem Druck größer ist als bei der lotrechten Schalung. Dieser Einfluss war in Versuch 6 besonders ausgeprägt, da mit einem 58-mm-Innenrüttler mehr Verdichtungsenergie auf den Frischbeton einwirkte als in den Referenzversuchen. Da in Versuch 12 die lotrechte Wand nur bis zu einer Höhe von 2,5 m befüllt wurde, betrug der Abstand zwischen Rüttler und Messstelle des maximalen Frischbetondrucks am Betonierende nur ca. 1 m, während bei geneigter Schalung ein Abstand von ca. 2 m zu verzeichnen war.

Die Ergebnisse der Versuche 5, 7 und 11 zeigen sowohl bei lotrechter als auch bei geneigter Schalung nahezu hydrostatischen Frischbetondruck und verdeutlichen somit, dass bei hohen Drücken der Einfluss der Schalungsneigung tendenziell abnimmt.

4 Numerische Untersuchungen

Zur numerischen Untersuchung des Frischbetondrucks wurde ein Modell zur Berechnung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungen auf Grundlage der Finiten-Elemente-Methode entwickelt. Das numerische Modell ist in der Lage, das zeitlich veränderliche Materialverhalten des Frischbetons während des Ansteifens abzubilden.

4.1 Modellbeschreibung

Die numerische Modellierung erfolgt als ebenes System mit dem FEM-Programmsystem ANSYS. Der Frischbeton wird mit Scheibenelementen abgebildet, die in übereinanderliegenden Schichten unterteilt sind (vgl. Bild 5). Jeder Schicht können unterschiedliche Materialparameter zugewiesen werden. Somit kann das zeitveränderliche Materialverhalten erfasst werden. Innerhalb der Scheibenelemente kommt das elasto-plastische Stoffgesetz nach DRUCKER & PRAGER [10] zur Anwendung. Die Schalhaut wird durch Balkenelemente modelliert. Als Geometrie können lotrechte oder auch parallel, einseitig und ungleich geneigte und auch gekrümmte Wände gewählt werden. Die Verbindung zwischen Frischbeton und Schalhaut erfolgt über Knoten-Kontaktelemente, die Druck- und Schubspannungen übertragen können, jedoch keine Zugspannungen.

Simulationsparameter:

- Konsistenzklasse: F6
- Wandhöhe: $H = 3,5 \text{ m}$
- Wanddicke: $b = 20 \text{ cm}$
- Neigung: $\alpha = 45^\circ$
- Steiggeschwindigkeit: $v = 1,2 \text{ m/h}$
- Erstarrungsende: $t_{E,eff} = 8,8 \text{ h}$
- Wichte: $\gamma_c = 23 \text{ kN/m}^3$

Berechnungsergebnis:

Frischbetondruck auf geneigte obere

Schalung: $\sigma_{ge,o,cal} = 37 \text{ kN/m}^2$

Schalungsdruck senkrecht
auf die obere Schalung

$\sigma_{ge,o,cal}$
[kN/m²]
10
20
30
40

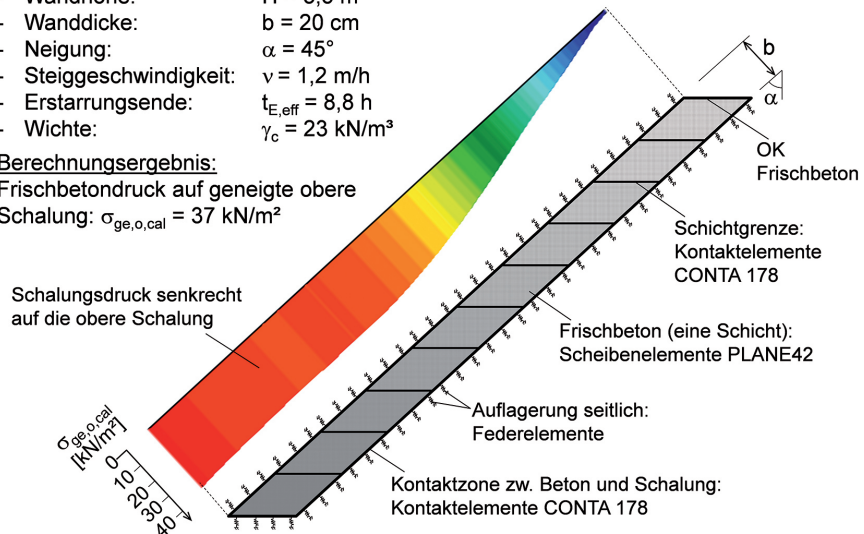


Bild 5: Numerisches Modell mit Verlauf des Frischbetondrucks auf die obere Schalung für ein exemplarisches Beispiel

Der zum Zeitpunkt des Betonierendes entstehende Frischbetondruck kann auf zwei Arten simuliert werden. Bei der transienten Berechnung erfolgt die Abbildung des Frischbetons im FE-Modell schichtweise in Zeitschritten. Dabei werden beim Abbilden einer neuen Schicht die Materialparameter der darunter liegenden „älteren“ Schichten entsprechend dem zeitlichen Fortschritt angepasst und die Spannungen der Scheibenelemente aus dem vorhergehenden Berechnungsschritt übertragen. Bei einer stationären Berechnung werden alle Frischbetonschichten in einem Zeitschritt in das FE-Modell implementiert und jede Frischbetonschicht erhält die ihrem „Alter“ zum Betonierende entsprechenden Materialkenngrößen. Für das Betonierende ist somit die Verteilung der Materialparameter über die Wandhöhe bei beiden Berechnungsarten identisch.

4.2 Implementierte System- und Materialparameter

Die Querdehnzahl ν_c und der Elastizitätsmodul E des Frischbetons werden als zeitlich veränderliche Größen nach PROSKE [7] modelliert. Die den Scheibenelementen zugewiesene Festigkeitshypothese nach DRUCKER & PRAGER [10] benötigt als Materialparameter den Winkel der inneren Reibung φ und die Kohäsion c . Die Kohäsion wurde zu $c = 0$ angenommen. Der Winkel der inneren Reibung inkl. Kohäsionsanteilen φ_{ges} wird über den Seitendruckbeiwert $\lambda = \sigma_h / \sigma_v$ unter Annahme eines aktiven Erddrucks berechnet. Aus Versuchsergebnissen [11], [12] mit einer sogenannten kombinierten Versuchseinrichtung (KVA) [13] an Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6 wurden Funktionen des Seitendruckbeiwerts als Mittelwerte in Abhängigkeit der Zeit $\lambda_{1,MW}(t/t_{eff})$ für eine nachgiebige Schalung abgeleitet. Eine Funktion des Seitendruckbeiwerts für SVB kann der Literatur [7] entnommen werden. Die Verläufe von $\lambda_{1,MW}(t/t_{eff})$ sind in Bild 6 dargestellt.

Die Kontaktelemente benötigen zum Abbilden des Reibungseinflusses zwischen Frischbeton und Schalung als Parameter den Reibbeiwert μ . Für die Konsistenzklassen

F5 und F6 wurden Reibbeiwerte aus Versuchsergebnissen [11], [12] verwendet. Für SVB sind zeitabhängige Funktionen in der Literatur vorhanden [7]. In Bild 7 sind Reibbeiwerte in Abhängigkeit der Zeit als Mittelwerte für die vorgenannten Konsistenzklassen mit Bewehrung und ohne Bewehrung dargestellt.

Für die Versuchsnachrechnung wird grundsätzlich eine Biegesteifigkeit der Schalhaut von $E \cdot I = 22,5 \text{ kNm}^2$ berücksichtigt. Die Schalungsunterkonstruktion wurde mit Federn mit einer Steifigkeit von $k = 12.500 \text{ kN/m je } 1 \text{ m}^2$ Schalungsoberfläche modelliert.

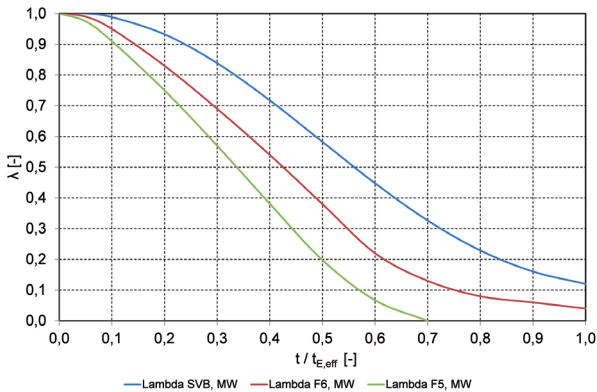


Bild 6: Zeitabhängige Funktionen von λ für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB als Mittelwerte

4.3 Ergebnisse der Versuchsnachrechnung

Zur Verifizierung des vorgestellten numerischen Modells wurden stationäre Vergleichsberechnungen zu den in Kapitel 2 vorgestellten Versuchen mit den in Kapitel 4.3 erläuterten Materialparametern durchgeführt. Die berechneten maximalen Frischbetondrücke $\sigma_{\text{lot,cal}}$ der lotrechten Schalung sind in Bild 8 (links) den jeweiligen gemessenen Frischbetondrücken σ_{lot} gegenübergestellt. Bild 8 (rechts) enthält die berechneten Frischbetondrücke der oberen geneigten Schalung $\sigma_{\text{ge,o,cal}}$ im Vergleich zu den jeweiligen gemessenen Frischbetondrücken $\sigma_{\text{ge,o}}$.

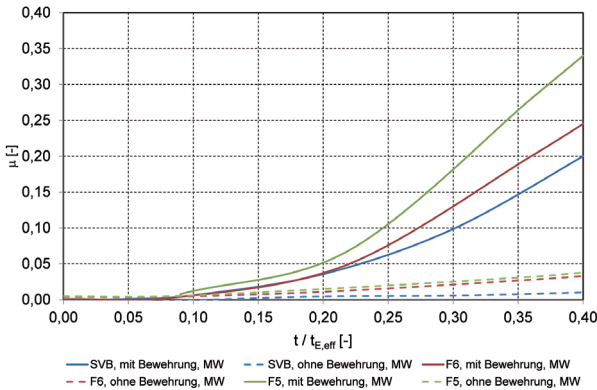


Bild 7: Zeitabhängige Funktionen von μ für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB als Mittelwerte

Die mit dem entwickelten numerischen Modell berechneten Frischbetondrücke zeigen eine gute Korrelation mit den Messergebnissen der Versuche. Mit geeigneten Ansätzen für den Seitendruckbeiwert λ und die Reibung μ , die den Randbedingungen der Versuche entsprechen, könnten weitere Verbesserungen im Hinblick auf die Genauigkeit der Rechenwerte erzielt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Betonierversuchen zur Untersuchung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungssystemen konnte zunächst gezeigt werden, dass der Einfluss des Siloeffektes, also der Bewehrung und der Bauteildicke, auf den Frischbetondruck signifikant ist. Es wurde festgestellt, dass bei Bauteilen mit konstanter Wanddicke der wesentliche Unterschied der Frischbetondrücke einer oberen und einer unteren geneigten Schalung aus dem Eigengewichtsanteil des Frischbetons resultiert. Die maßgeblichste Erkenntnis der experimentellen Untersuchungen ist, dass bei konstanter Wanddicke der auf eine geneigte Schalhaut einwirkende Frischbetondruck stets kleiner ist als der Frischbetondruck bei einer vergleichbaren lotrechten Wand.

Im Rahmen der zukünftigen Forschungstätigkeit sollen Quantilwerte für die Funktionen des Seitendruckbeiwertes $\lambda(t/t_{\text{eff}})$ und des Reibbeiwerts $\mu(t/t_{\text{eff}})$ für Betone mit wei-

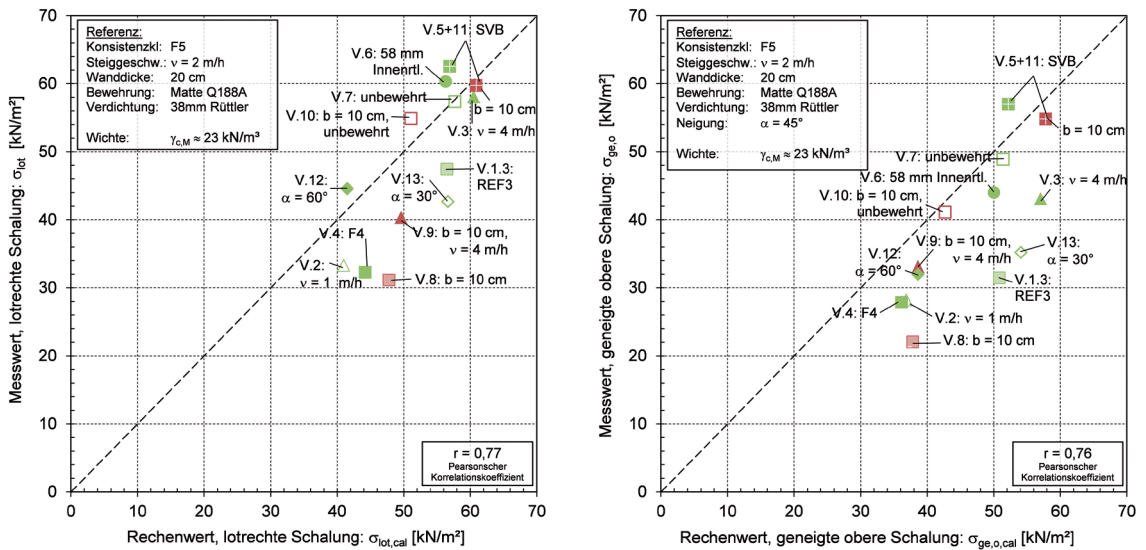


Bild 8: Vergleich zwischen Versuch und Rechnung: links: für die lotrechte Schalung; rechts: für die geneigte obere Schalung

cher bis sehr fließfähiger Konsistenz bestimmt werden. Mit einem derart erweiterten Modell können die numerischen Untersuchungen dann vervollständigt und funktionale Zusammenhänge entwickelt werden, mit denen sich der Frischbetondruck für verschiedene geneigte und gekrümmte Schalungsgeometrien numerisch präzise vorhersagen lässt.

Danksagung

Besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Forschungsvorhabens. Darüber hinaus danken die Autoren dem Güteschutzverband Betonschalungen e.V., der MEVA Schalungstechnik GmbH Haiterbach sowie der Waibel Beton Darmstadt GmbH & Co. KG für deren Unterstützung.

Literatur

- [1] DIN 18218: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. DIN 18218:2010-01, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [2] AST, G.; FRÖHLICH, K.-C.: Gerüste und Schalungen. In: VON HALÁSZ, R.; SCHEER, C. (Hrsg.): Holzbau-Taschenbuch, S. 875–921, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996.
- [3] FREUND, B.; PROSKE, T.; GRAUBNER, C.-A.: Frischbetondruck bei geneigten Schalungen – Sachstandbericht. In: FRANZ, V.; HOFFMANN, F. H.; MOTZKO, C.; FRICKE, J. G. (Hrsg.): Tagungsband des 21. Kassel-Darmstädter Baubetriebsseminars Schalungstechnik, GfBW – Arbeitskreis Schalung, 24.–25.11.2011 in Kassel, 2011, Kap. C1, S. 1–11.
- [4] ACI 347-04: Guide to Formwork for Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2004.
- [5] Bulletin D'Information No 115: Manuel de Technologie „Coffrage“. Comité Euro-International du Béton, Paris, 1977.
- [6] CIRIA Report 108: Concrete Pressure on Formwork. Construction Industry Research and Information Association, London, 1985.
- [7] PROSKE, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung. Dissertation, TU Darmstadt, Institut für Massivbau, Heft 12, Darmstadt: Eigenverlag, 2007.
- [8] DIN EN 206-1: Beton – Teil 1: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1:2000. DIN EN 206-1:2001-07, Deutsches Institut für Normung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2001.
- [9] DIN EN 12350-8 (2010): Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch; Deutsche Fassung EN 12350-8:2010, Deutsches Institut für Normung, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [10] DRUCKER, D. C.; PRAGER, W.: Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics 10 (1952), Heft 2, S. 157–165.
- [11] GRAUBNER, C.-A.; BOSKA, E.; MOTZKO, C.; PROSKE, T.; DEHN, F.: Formwork pressure induced by highly flowable concrete – Design approach and transfer in practice. Structural Concrete 13 (2012), Heft 1, S. 51–60.
- [12] BRAMESHUBER, W.; BEITZEL, H.; BEITZEL, M.; BOHNEMANN, C.; DEHN, F.; GRAUBNER, C.-A.; KÖNIG, A.; LINGEMANN, J.; MÜLLER, H. S.; PISTOL, K.; PROSKE, T.; STETTNER, C.; ZILCH, K.: Formwork pressure induced by highly flowable concretes – Material investigations and large-scale tests. Structural Concrete 12 (2011), Heft 4, S. 270–280.
- [13] GRAUBNER, C.-A.; PROSKE, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 2, S. 88–96.

Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Projektbearbeiter

Björn Freund M.Sc.
Dr.-Ing. Tilo Proske
Dr.-Ing. Ngoc Linh Tran

Projektlaufzeit

09/2011 – 08/2014

Projektpartner

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack, Fachbereich 1, Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Güteschutzverband Betonschalungen e.V.
MEVA Schalungstechnik GmbH Haiterbach
Waibel Beton Darmstadt GmbH & Co. KG

Web

www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau